

# TÁGIDES

## OS AQUÍFEROS DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DO RIO TEJO E DAS RIBEIRAS DO OESTE

### Saberes e Reflexões



**ARH**  
T E J O

Administração da  
Região Hidrográfica  
do Tejo I.P.



MINISTÉRIO DO AMBIENTE  
E DO ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO

#### TÍTULO

Aquíferos das Bacias Hidrográficas do Rio Tejo  
e das Ribeiras do Oeste

#### AUTOR

ARH do Tejo, I.P.  
Departamento de Recursos Hídricos Interiores - DRHI

#### EDITOR

ARH do Tejo, I.P.

#### FOTOGRAFIA

RCL / Rui Cunha ©

#### DISTRIBUIÇÃO

ARH do Tejo, I.P.,  
Rua Braamcamp, 7, 1250-048 Lisboa

#### 1ª EDIÇÃO

Abril © 2010

#### DESIGN E PRODUÇÃO

Arte Final, Design e Publicidade, Lda. / GIO

#### ISSN

1647-4007

#### ISBN

978-989-96162-5-7

#### DEPÓSITO LEGAL

310170/10



# Sistema Tejo-Sado: recarga de águas subterrâneas

Manuel Mendes Oliveira  
Laboratório Nacional de Engenharia Civil

## INTRODUÇÃO

A recarga natural constitui os recursos hídricos subterrâneos naturais renováveis. Pode-se considerar, como fontes de recarga, a recarga por infiltração da água da chuva, a recarga a partir de cursos de água (cursos de água influentes), e no caso de aquíferos multicamada a recarga a partir da drenância de camadas adjacentes.

A recarga por infiltração da água da chuva refere-se à quantidade de água que se infiltra abaixo do solo após os processos de evapotranspiração e de escoamento directo, e que vai ter um percurso subterrâneo, podendo, em condições de não exploração, ficar armazenada no aquífero ou constituir escoamento subterrâneo que posteriormente aflora à superfície, contribuindo para o escoamento dos cursos de água (escoamento de base).

O sistema Tejo-Sado é constituído pelos seguintes três sistemas aquíferos definidos em Almeida *et al.* (2000): Aluviões do Tejo, Bacia do Tejo-Sado/Margem Esquerda e Bacia do Tejo-Sado/Margem Direita.

Esta comunicação divide-se fundamentalmente em duas partes: (1) a caracterização da recarga para a primeira geração dos Planos de Bacias Hidrográficas do rio Tejo (aprovado pelo Decreto Regulamentar nº 18/2001, de 7 de Dezembro), com uma descrição sumária das metodologias utilizadas (Oliveira *et al.*, 1999), e (2) uma perspectiva das metodologias utilizáveis para o cálculo da recarga do Plano de Gestão de Região Hidrográfica do rio Tejo e da segunda geração do Plano de Bacia Hidrográfica das ribeiras do Oeste, em conformidade com os objectivos destes planos e fazendo uso das metodologias sugeridas para o seu cálculo.

## QUANTIFICAÇÃO DA RECARGA NOS PLANOS DE BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TEJO E DAS RIBEIRAS DO OESTE

A quantificação da recarga nos Planos de Bacia do rio Tejo e das ribeiras do Oeste foi feita recorrendo a três abordagens: pesquisa bibliográfica; método da decomposição do hidrograma de escoamento superficial; método de Vermeulen *et al.* (1993).

O método da decomposição do hidrograma de escoamento superficial permite estimar a recarga por períodos de tempo através da determinação do escoamento de base de um curso de água superficial. Este escoamento de base é uma medida da descarga do sistema subterrâneo quando não há armazenamento, evaporação ou extracção de água superficial. Por sua vez, a descarga do sistema hídrico subterrâneo reflecte a recarga que ocorre nesse meio quando, na sub-bacia hidrográfica em estudo, a recarga é a única forma de entrada de água no meio subterrâneo, não há extracções nem evapotranspiração a partir da zona saturada e toda a água que deixa a zona saturada descarrega para a sub-bacia hidrográfica. Para a aplicação deste método são necessárias séries de precipitação e de escoamento superficial diárias na sub-bacia hidrográfica, tendo a metodologia da decomposição dos hidrogramas sido programada no programa DecHidr.bas (Oliveira *et al.*, 1997), que foi utilizada para os Planos de Bacia Hidrográfica, e que posteriormente sofreu actualizações como as apresentadas em Oliveira (2004), incluídas no programa DecHidr\_VB.vbp.

Usando as médias dos valores anuais de escoamento de base obtidos em 11 sub-bacias hidrográficas, calculou-se a recta de regressão linear entre o escoamento de base (Eb) e a precipitação (P), que se utilizou para a estimativa da recarga das formações hidrogeológicas do Maciço Antigo na área dos Planos de Bacia Hidrográfica do rio Tejo e das ribeiras do Oeste:

$$Eb = 0,5448 \times P - 311 \quad (\text{mm/a}) \quad (\text{Eq. 1})$$

Posteriormente, a inclusão dos resultados da decomposição dos hidrogramas de escoamento superficial em duas novas sub-bacias hidrográficas levou à reformulação da equação de cálculo do escoamento de base (Oliveira, 2004):

$$Eb = 0,5210 \times P - 284 \quad (\text{mm/a}) \quad (\text{Eq. 2})$$

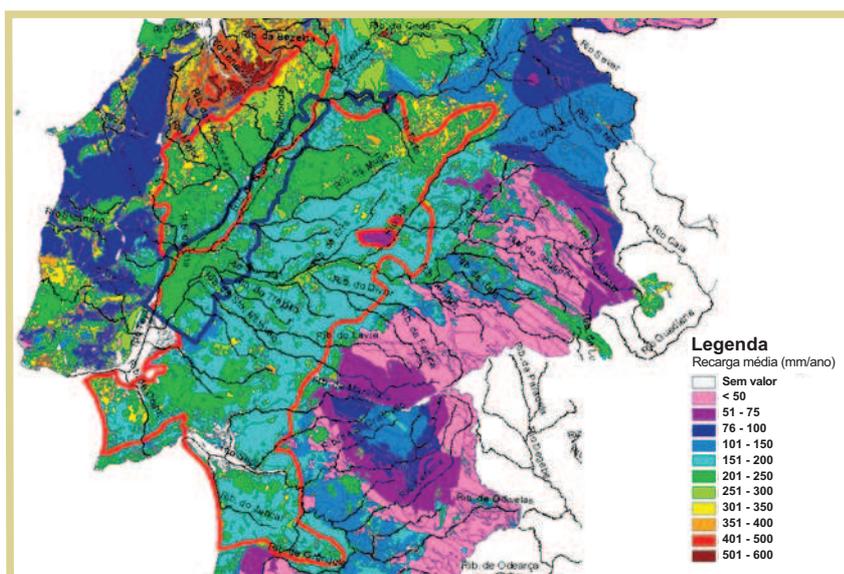
O método de Vermeulen *et al.* (1993) permite estimar a recarga anual média utilizando como dados de entrada a precipitação anual média, o número característico de escoamento (NC) e a quantidade máxima de água disponível para evapotranspiração (AGUT), duas variáveis que dependem do material do solo e da ocupação do solo, cujas propriedades ou características foram interpretadas e tabeladas tendo em vista a definição de variáveis que permitem quantificar o NC e o AGUT. O método em questão é um método empírico que foi derivado a partir de correlações entre os resultados dos valores anuais médios de precipitação, infiltração, evapotranspiração e infiltração profunda, obtidos pelas corridas do modelo de balanço hídrico sequencial diário BALSEQ (Lobo Ferreira, 1981) em sete locais de Portugal Continental.

Para a aplicação do método de Vermeulen *et al.* (1993) sobrepuseram-se quatro bases cartográficas: o mapa de precipitação anual média, produzido no âmbito dos Planos de Bacia, o mapa de solos do Atlas do Ambiente, à escala 1:1 000 000, o mapa de ocupação do solo Corine Land Cover, à escala 1:100 000, e a carta geológica de Portugal à escala 1:500 000. Nas áreas de ocorrência das formações carsificadas, considerou-

se que o escoamento directo calculado por este método se infiltrava numa fractura ou cavidade cárstica ao fim de um determinado percurso, pelo que se adicionou o volume de escoamento directo ao volume da recarga calculada pelo método.

A Figura 1 apresenta a distribuição da recarga obtida para os Planos de Bacia do Tejo, das ribeiras do Oeste e do Sado. Nos sistemas aquíferos que constituem o sistema Tejo-Sado os valores de recarga variam entre 100 mm/ano e 572 mm/ano. O Quadro 1 apresenta, por sistema aquífero, a recarga média anual e as taxas de recarga. Note-se que os volumes de recarga apresentados referem-se exclusivamente à recarga por infiltração da água da chuva, que é sem dúvida a maior fonte de recarga das águas subterrâneas. Ao todo, na áreas dos três sistemas aquíferos, estima-se uma recarga de 1789 hm<sup>3</sup>/ano.

É de referir que em relação à distribuição da recarga representada na Figura 1, esta não representa o volume de água que recarrega uma coluna vertical do sistema aquífero. A Figura 2 mostra um modelo hipotético das linhas de fluxo do escoamento subterrâneo numa secção do sistema aquífero da Margem Esquerda, entre Mora e o estuário do Tejo a N de Alcochete, não se representando a anisotropia do meio nem a sua estrutura em camadas. A figura mostra sistemas de escoamento locais, regionais e intermédios. Pode-se verificar que, numa coluna vertical do sistema, quanto maior a profundidade, mais longo é o percurso que a água subterrânea percorreu, tendo recarregado o sistema a distâncias consideráveis que aumentam com a profundidade. O volume dessa recarga pode ter sido muito diferente do valor da recarga que ocorre na parte superior da coluna vertical em questão, devido a diferentes condições de infiltração em consequência, por um lado, de características de solo e de ocupação do solo diferentes, e, por outro lado, de condições climáticas diferentes na altura em que ocorreu a recarga. Este modelo conceptual permite também perceber que a piezometria registada a uma certa profundidade da coluna vertical é função da recarga que ocorreu numa área afastada, e não da recarga que ocorre sobre a coluna vertical. Assim, a análise da variação do nível piezométrico num determinado local só traduz a recarga que ocorreu nesse local se for medido na parte superior de um aquífero livre.



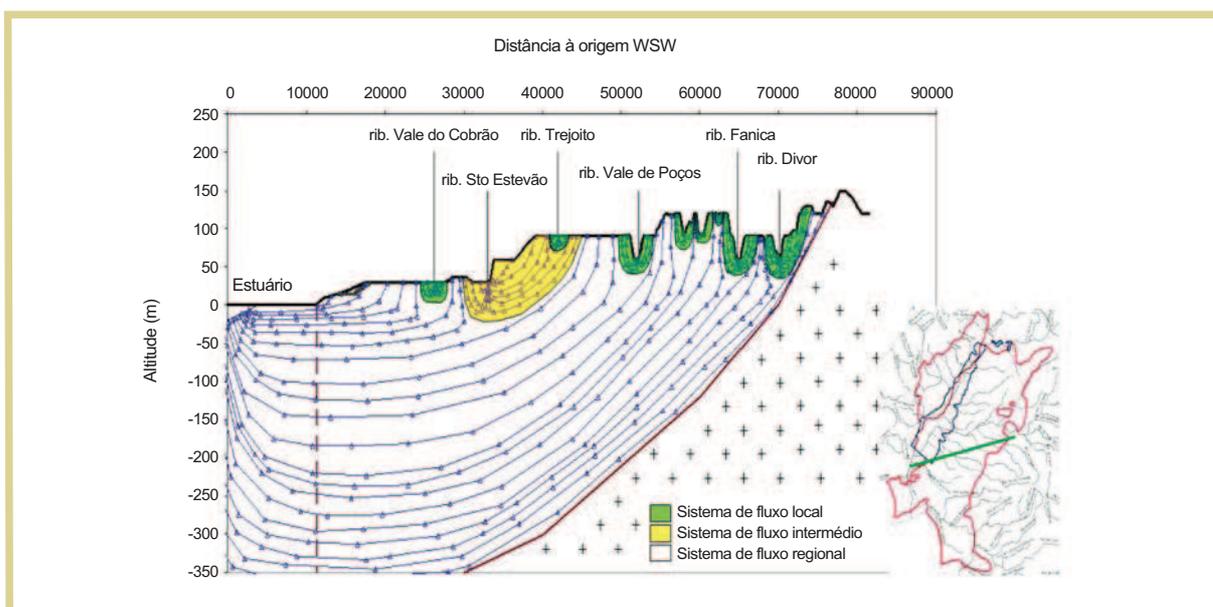
**FIGURA 1** - Recarga de águas subterrâneas por infiltração da água da chuva  
Fonte: Oliveira *et al.* (1999, 2001), Lobo Ferreira *et al.* (1999)

**QUADRO 1** – Resultados das corridas e comparação dos valores médios obtidos pelos modelos de balanço hídrico sequencial diário e mensal

Sistema aquífero	Recarga média (mm/a)	Recarga média (hm <sup>3</sup> /a)	Precipitação média (mm/a)	Taxa de recarga média (%)	Volume extraível médio (mm/a)	Volume extraível médio (hm <sup>3</sup> /a)
Aluviões do Tejo	210	214	648	32	147	148
Bacia do Tejo-Sado / Margem Direita	258	355	781	33	180	248
Bacia do Tejo-Sado / Margem Esquerda	211	1220	687	31	147	851

Fonte: adaptado de Oliveira *et al.* (1999)

De forma a garantir a manutenção do escoamento de base dos cursos de água superficiais dependentes dos sistemas aquíferos e para se ter maior confiança relativamente ao volume de águas subterrâneas captável, considerou-se que a extracção de águas subterrâneas nunca deveria exceder em 70 % o volume anual de recarga média. O Quadro 1 apresenta também o volume extraível por sistema aquífero, estimado num valor global de 1247 hm<sup>3</sup>/ano.



**FIGURA 2** - Modelo hipotético do escoamento do sistema aquífero da Margem Esquerda

## QUANTIFICAÇÃO DA RECARGA NOS NOVOS PLANOS DE GESTÃO DE REGIÃO HIDROGRÁFICA DO TEJO E DE BACIA HIDROGRÁFICA DAS RIBEIRAS DO OESTE

Para os novos Planos de Gestão de Região Hidrográfica do Tejo e de Bacia Hidrográfica das ribeiras do Oeste pretende-se, de acordo com as especificações do concurso para a sua realização, que sejam produzidos valores sazonais «tendo em vista diversos estudos, nomeadamente a modelação do escoamento subterrâneo

em regime transitório»; pretende-se também a obtenção dos valores de recarga anual média por massa de água, o que terá como objectivo, entre outros, a determinação do estado quantitativo de cada massa de água subterrânea.

Uma das formas mais adequadas para estimar a recarga espaciotemporal das águas subterrâneas é a aplicação de modelos de balanço hídrico sequencial diário (MBHSD), por permitirem estimar a recarga em função dos solos, das características de ocupação do terreno e da precipitação diária, com base em informação normalmente disponível, embora nem sempre à escala mais adequada. Na aplicação à bacia do Tejo-Sado, a maior dificuldade é a inexistência de cartografia de solos a uma escala igual ou superior à 1:100 000, na região um pouco a norte do rio Tejo, e a desactualização nalgumas áreas da cartografia existente.

Em relação à caracterização do estado quantitativo da água subterrânea, a Portaria nº 1115/2009, de 29 de Setembro, sugere que «o valor da recarga média anual pode ser determinado através do método do balanço hídrico sequencial mensal, apoiado em séries hidrometeorológicas com um mínimo de 30 anos e, sempre que possível, em validações baseadas na análise piezométrica».

Este aspecto merece reflexão uma vez que não tem sido tradição utilizar modelos de balanço hídrico sequencial mensal (MBHSM) para estimar a recarga. Por exemplo, um dos MBHSM mais utilizados, de Thorntwaite-Matter, só permite estimar excedentes hídricos mensais, correspondentes ao somatório da recarga com o escoamento directo superficial, mas não permite distinguir entre estes dois processos. Desenvolvendo um processo que permita fazer esta diferenciação, uma dificuldade maior consiste no facto dos processos que conduzem à formação dos excedentes hídricos dependerem da distribuição da precipitação, pelo que não é possível traduzi-los através de totais mensais.

Entretanto o INAG, I.P. desenvolveu uma metodologia para estimar a recarga através de um balanço hídrico sequencial mensal, aguardando-se a divulgação de um documento com a referida metodologia.

Para reflectir sobre a forma como um MBHSM pode ser utilizado para estimar a recarga, fez-se um conjunto de corridas com o MBHSM e um MBHSD, neste caso o modelo BALSEQ\_MOD (Oliveira, 2004), que utilizou como opções de corrida o cálculo da infiltração usando a capacidade de infiltração do solo, e o cálculo da evapotranspiração, utilizando o balanço hídrico sequencial do solo, a partir da evapotranspiração de referência e o coeficiente cultural dual.

Considerou-se como dado de partida uma série de precipitação diária com 28 anos, a correspondente série de evapotranspiração de referência mensal e combinações de tipos de solo, com propriedades de infiltração e armazenamento distintas, e diferentes ocupações do solo (floresta de folhosas e solo descoberto).

O Quadro 2 mostra os valores médios das séries utilizadas, expressos em mm/mês, obtidos pela corrida dos dois modelos de balanço hídrico sequencial. A comparação dos valores de excedentes hídricos calculados permite verificar que o MBHSM subestima os valores obtidos pelo MBHSD, podendo para os casos estudados corresponder a um valor entre 13 % e 74 % dos valores obtidos pelo MBHSD. A Figura 3A) permite visualizar, para o caso da ocupação do solo por floresta de folhosas, a distribuição dos excedentes hídricos mensais. Pode-se verificar que no caso dos solos argiluvitados, mais argilosos, com menor capacidade de infiltração, o MBHSM não estima excedentes mensais, ao contrário do MBHSD, o que se deve ao facto do MBHSM não considerar a distribuição da precipitação.

**QUADRO 2** – Resultados das corridas e comparação dos valores médios obtidos pelos modelos de balanço hídrico sequencial diário e mensal

Ocupação do solo + Solo	MBHSD (mm/mês)		MBHSM (mm/mês)		EXCm/EXCd	RECd/EXCm
	EDd	RECd	EXCd	EXCm		
311 + Al	4	14	18	9	49%	158%
311 + Pag	26	4	30	4	13%	109%
311 + Rg	0	19	19	12	64%	156%
331 + Al	4	23	27	20	74%	115%
331 + Pag	26	4	30	19	62%	22%
331 + Rg	0	28	28	20	71%	142%

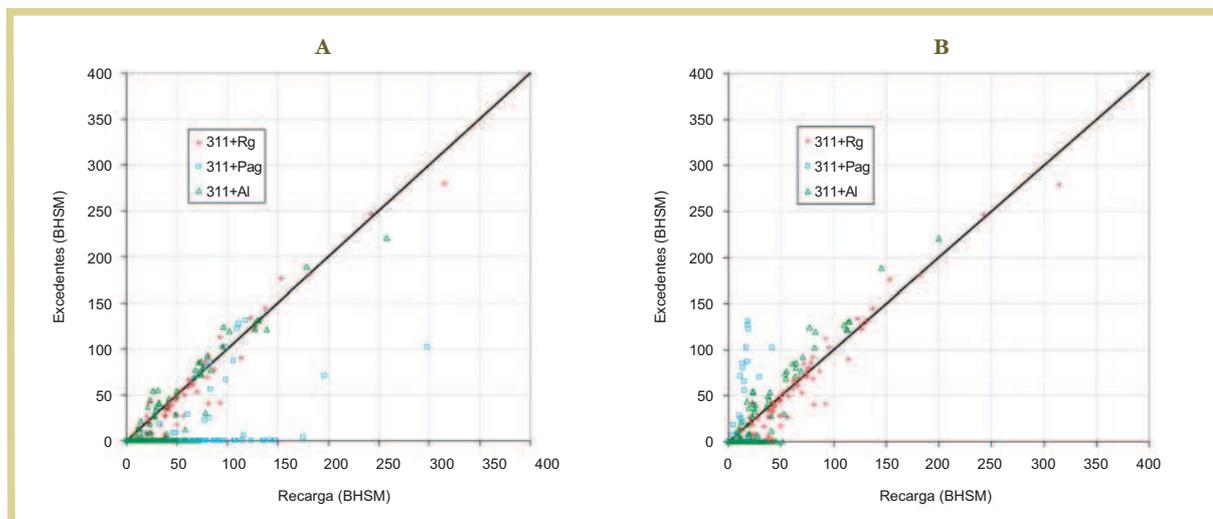
Ocupação do solo: 311-Floresta de folhosas; 331-Solo descoberto. Solos: Rg-Regossolos; Al-Aluviossolos, de textura ligeira; Pag-Solos Argiluvitados. EDd-escoamento directo calculado pelo MBHSD; RECd-recarga calculada pelo MBHSD; EXCd-excedentes calculados pelo MBHSD (=EDd+RECd); EXCm-excedentes calculados pelo MBHSM.

Da análise dos valores médios do Quadro 2 verifica-se também que a recarga média calculada pelo MBHSD é também superior aos próprios excedentes hídricos mensais calculados pelo MBHSM, o que dificulta a tarefa de estimar a recarga a partir dos valores obtidos pelo balanço mensal. Esta situação ganha especial importância nos muitos meses em que o MBHSM estima excedentes hídricos nulos, como se pode visualizar no exemplo da Figura 3B).

Da análise dos valores mensais não foi possível estabelecer regras que correlacionassem a recarga mensal com o excedente hídrico mensal. Daí que se tenha procurado uma função descontínua, variável não só com o valor do excedente mensal mas também com o tempo, que relacione a recarga mensal com o excedente hídrico mensal. Dado o número de situações em que o excedente mensal é nulo, houve necessidade de fazer com que essa função descontínua dependesse também da precipitação mensal.

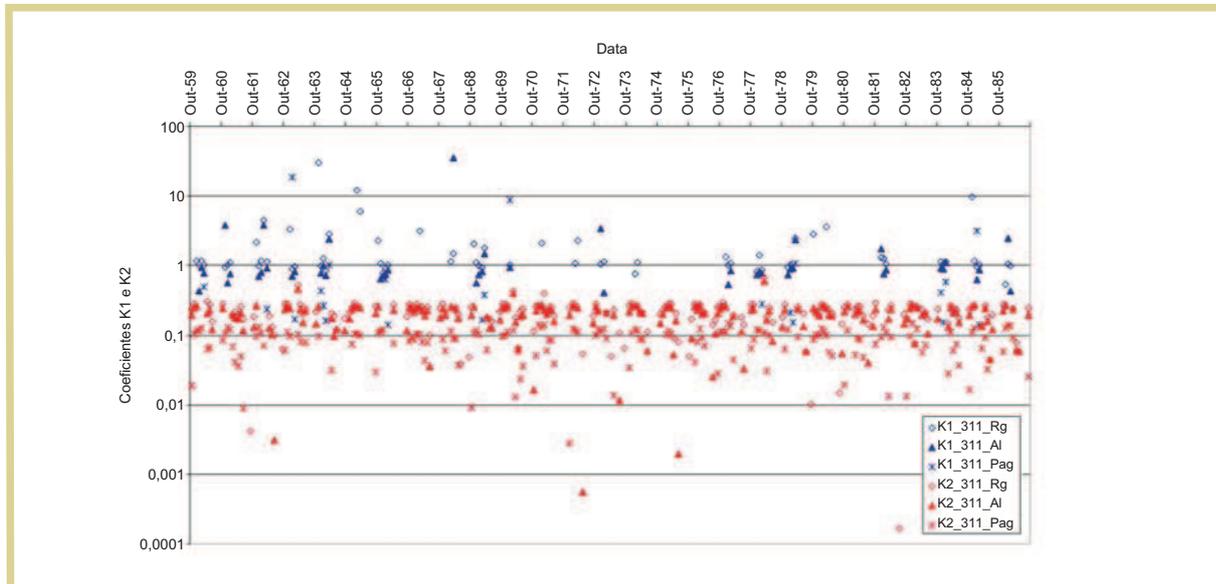
Essa função tem a seguinte forma:

$$REC = \begin{cases} K_1 \cdot EXCm & \text{se } EXCm > 0 \\ K_2 \cdot Pm & \text{se } EXCm = 0 \end{cases} \quad (\text{Eq. 3})$$



**FIGURA 3** - Comparação **A** - dos excedentes hídricos mensais calculados pelos dois métodos de balanço hídrico sequencial e **B** - dos excedentes hídricos mensais calculados pelo MBHSM com as recargas mensais calculadas pelo MBHSD. Ocupação do solo: floresta de folhosas

A Figura 4 representa os valores dos coeficientes  $K_1$  e  $K_2$  para o caso da ocupação do solo de floresta de folhosas. Pode-se constatar o número de casos em que o parâmetro  $K_2$  assume valores, o que significa que os excedentes mensais calculados pelo MBHSM foram nulos.



**FIGURA 4** - Coeficientes  $K_1$  e  $K_2$  da equação 3 para o caso da ocupação do solo de floresta de folhosas

## CONCLUSÃO

O método mais adequado para calcular a recarga dos sistemas aquíferos da bacia do Tejo-Sado e até da maior parte das áreas dos novos planos de bacia hidrográfica ou de gestão de região hidrográfica é o baseado nos modelos de balanço hídrico sequencial diário (MBHSD), que permite integrar as condições de ocupação do solo, as características do solo, factores geológicos, precipitações e evapotranspirações de referência. Este método permite estimar a recarga distribuída na área em estudo e ao longo do tempo.

A aplicação deste método requer os seguintes passos:

1. Divisão do sistema aquífero em áreas aproximadamente homogêneas de solo, ocupação de solo e factor geológico, formando associações [solo, ocupação do solo, factor geológico];
2. Caracterização da precipitação anual média e da evapotranspiração de referência, para cada área homogênea;
3. Caracterização dos parâmetros de corrida dos modelos de balanço hídrico, para cada área homogênea;
4. Selecção de séries de precipitação diárias e de séries de elementos climatológicos diárias ou mensais para o cálculo da evapotranspiração de referência;
5. Corrida de MBHSD para as séries de precipitação e de evapotranspiração de referência para todas as associações [solo, ocupação do solo, factor geológico].

Perspectiva-se que, no caso de não ser possível aplicar os MBHSD, por falta de informação, ou por o número de corridas desses modelos ser excessivo, se possa calcular a recarga por balanço hídrico sequencial mensal. A aplicação deste método de balanço requer à mesma que se tomem os passos 1. a 5. referidos, mas desta vez utilizando nos passos 4. e 5. locais representativos da distribuição dos processos de precipitação e de evapotranspiração de referência, e depois continuando pelos seguintes passos:

6. Corrida de MBHSM para as mesmas situações em que se correu o MBHSD;
7. Determinação dos coeficientes  $K_1$  e  $K_2$  da equação 3;
8. Corrida do MBHSM para as séries de precipitação de evapotranspiração de referência mensal, nas áreas localizadas fora dos locais representativos de distribuição de elementos climatológicos;
9. Cálculo da recarga mensal aplicando os coeficientes  $K_1$  e  $K_2$ , determinados para os locais mais próximos e para as associações [solo, ocupação do solo, factor geológico], aos valores de EXCm e de PRCm do BHSM.

O cálculo da recarga dos sistemas aquíferos da bacia do Tejo-Sado ou das restantes áreas dos planos de gestão ou de bacia hidrográfica deverá também usar outros métodos de cálculo, entre os quais se destacam o da decomposição de hidrogramas de escoamento superficial (permite estimar a recarga ao longo do tempo mas não permite estimar a recarga distribuída), ou o do balanço de cloretos (que só permite estimar valores anuais médios, mas permite considerar a sua distribuição no espaço).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida, C.; Mendonça, J. J. L.; Jesus, M. R. e Gomes, A. J. (2000) – "Sistemas Aquíferos de Portugal Continental", Centro de Geologia e Instituto da Água, Dezembro de 2000, 661 pp..

Lobo Ferreira, J. P. (1981) – "Modelação matemática do balanço hídrico sequencial diário. Exemplo de aplicação à região Algarvia (Faro)". Comunicação ao Seminário "Os recursos hídricos subterrâneos e a sua utilização. O caso do Algarve". Lisboa, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos.

Lobo Ferreira, J. P. C., Moinante, M. J., Oliveira, M. M., Leitão, T. E., Novo, M. E., Moreira, P. e Henriques, M. J. (1999) – "Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Sado. 1ª Fase. Caracterização dos Recursos Hídricos Subterrâneos da Área Abrangida pelo Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Sado. Anexo Temático 4 – Recursos Hídricos Subterrâneos". Relatório Interno. LNEC-GIAS, Outubro de 1999, 258 pp..

Oliveira, M. M. (2004) – "Recarga de águas subterrâneas: Métodos de avaliação". Doutoramento em Geologia (Hidrogeologia), Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, Departamento de Geologia, 440 pp., 2004. Também: Teses e Programas de Investigação – TPI 42, ISBN 972-49-2093-3, Editora LNEC, 2006.

Oliveira, M. M.; Moinante, M. J.; Lobo-Ferreira, J. P. (1997) – "Cartografia Automática da Vulnerabilidade de Aquíferos com Base na Aplicação do Método DRASTIC". Relatório Final. Lisboa, LNEC, Relatório 60/97-GIAS, 535 pp..

Oliveira, M. M., Lobo-Ferreira, J. P., Novo, M. E. (1999) – Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Tejo – 1.<sup>a</sup> Fase –  
– Análise e Diagnóstico da Situação Actual. Anexo Temático 4 – Recursos Hídricos Subterrâneos, Tomo B –  
– Caracterização do Balanço Hídrico Subterrâneo. Estudo realizado para a Hidrotécnica Portuguesa – Con-  
sultores para Estudos e Projectos Lda., Relatório PBH - Tejo Proc. 607/1/13022 – LNEC.DH.GIAS, Lisboa,  
379 pp..

Oliveira, M. M., Novo, M. E., Moinante, M. J., Henriques, M. J., Lobo Ferreira, J. P. C. (2001) – "Plano de  
Bacia Hidrográfica das Ribeiras do Oeste. 1.<sup>a</sup> Fase – Análise e Diagnóstico da Situação Actual. Anexo  
Temático 4 – Recursos Hídricos Subterrâneos". Relatório Interno. Relatório Final, LNEC-GIAS, Janeiro de  
2001, 299 pp..

Oliveira, M. M. (2001) – "A Estimativa da Recarga das Águas Subterrâneas a Partir da Decomposição de  
Hidrogramas de Escoamento Superficial – O Programa de Computador DECHIDR\_VB.VBP", Seminário  
sobre "A Hidroinformática em Portugal", Publicação em CD-ROM, Laboratório Nacional de Engenharia Civil,  
Lisboa, 15-16 Novembro, 2001.

Vermeulen, H., Lobo Ferreira, J. P., Oliveira, M. M. (1993) – "A method for estimating aquifer recharge in  
DRASTIC vulnerability mapping". Comunicação apresentada ao seminário "Águas Subterrâneas e Ambiente",  
realizado pela Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos (APRH) em Lisboa, em Maio de 1993. Também  
"Advances in Water Resources Technology and Management" (Ed. G. Tsakiris e M. A. Santos), "Proceedings  
of the Second European Conference on Advances in Water Resources Technology and Management".  
Rotterdam, A. A. Balkema, 1994.